

长期施用有机肥和过磷酸钙对潮土有效磷积累与淋溶的影响*

黄绍敏** 郭斗斗 张水清

(河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所, 郑州 450002)

摘要 利用20年定位试验研究了施用化肥和有机肥对潮土耕层土壤有效磷(Olsen-P)含量与作物产量的关系及土壤Olsen-P积累和垂直移动规律的影响。结果表明:土壤Olsen-P含量在10~40 mg·kg⁻¹能保证小麦、玉米有较高的产量,土壤Olsen-P含量大于40 mg·kg⁻¹发生显著淋溶,轻壤质潮土Olsen-P发生淋溶的阈值为40 mg·kg⁻¹。连续施用化肥(NPK)和秸秆还田处理(SNPK)施磷量在77~90 kg·hm⁻²,平均每100 kg P·hm⁻²使耕层土壤Olsen-P提高0.63~0.72 mg·kg⁻¹,每年提高0.49~0.65 mg·kg⁻¹,达到淋失阈值需要45~60年。有机肥与化肥结合(MNPK、MNPK2和1.5 MNPK),年施磷量为210 kg·hm⁻²时,土壤Olsen-P(Y)与施肥年度(x)的关系为: $Y_{1.5\text{MNPK}} = 4.506x + 6.4464$ ($R^2 = 0.8862$),平均每年增加4.5 mg·kg⁻¹,连续施用8年可使耕层土壤Olsen-P达到淋失阈值;年施磷量为125和140 kg·hm⁻²时,土壤Olsen-P与施肥年度的关系为: $Y_{\text{MNPK2}} = 2.4765x + 13.563$ ($R^2 = 0.9307$)和 $Y_{\text{MNPK}} = 3.1097x + 6.9615$ ($R^2 = 0.8562$),平均每年增加2.47和3.1 mg·kg⁻¹,连续施用11年可使耕层土壤Olsen-P达到淋失阈值。有机无机肥结合处理土壤Olsen-P积累速度是化肥处理的3.5倍,过量施用有机肥增加了土壤Olsen-P的积累和淋失。

关键词 潮土 长期定位试验 Olsen-P 积累与淋溶 有机肥

文章编号 1001-9332(2011)01-0093-06 中图分类号 P463.2 文献标识码 A

Effects of long-term application of organic fertilizer and superphosphate on accumulation and leaching of Olsen-P in Fluvo-aquic soil. HUANG Shao-min, GUO Dou-dou, ZHANG Shui-qing (*Institute of Plant Nutrition and Resources Environment, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China*). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2011, 22(1): 93-98.

Abstract: Based on a 20-year experiment of fertilization with organic and chemical fertilizers on a Fluvo-aquic soil under wheat-corn cropping system, this paper studied the relationships between Olsen-P concentration in plough layer and crop yields as well as the accumulation and vertical translocation of Olsen-P in soil profile. The results showed that when the Olsen-P concentration in plough layer maintained at 10-40 mg·kg⁻¹, the grain yields of wheat and corn were higher, whereas when the concentration of Olsen-P in plough layer was higher than 40 mg·kg⁻¹, it started to leach, which meant that in light loam Fluvo-aquic soil, the threshold value for P leaching might be 40 mg·kg⁻¹. In the treatments of chemical fertilization (NPK) and corn straw returning (SNPK) with the P application rate of 77-90 kg·hm⁻², the Olsen-P concentration in plough layer was increased by 0.63-0.72 mg·kg⁻¹ per 100 kg·hm⁻² of applied P, with an annual increment of 0.49-0.65 mg·kg⁻¹ and needed 45-60 years for reaching the threshold value for P leaching. In the treatments of chemical fertilization combined with manure application (MNPK, MNPK2, and 1.5MNPK), the formula of Olsen-P accumulation in 0-20 cm soil layer were $Y_{\text{MNPK}} = 3.1097x + 6.9615$ ($R^2 = 0.8562$), $Y_{\text{MNPK2}} = 2.4765x + 13.563$ ($R^2 = 0.9307$), and $Y_{1.5\text{MNPK}} = 4.506x + 6.4464$ ($R^2 = 0.8862$). It might take 8 years to reach the threshold value for Olsen-P leaching when the P appli-

* 国家高技术研究发展计划节水农业项目(2006AA100215)和河南省重大公益性科研项目(081100911500)资助。

** 通讯作者。E-mail: hsm503@126.com

2010-06-07 收稿, 2010-10-21 接受。

cation rate in treatment 1.5MNPk was $210 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 11 years when the P application rate in treatments MNPk2 and MNPk was 125 and $140 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. Organic fertilization combined with chemical fertilization increased the Olsen-P accumulation rate being 2.5 times higher than chemical fertilization. Excessive application of organic fertilizer could increase the accumulation and leaching of Olsen-P in soil profile.

Key words: Fluvo-aquic soil; long-term experiment; Olsen-P; accumulation and leaching; organic fertilizer.

磷素是作物生长必需营养元素,同时是潮土区作物产量提升的限制元素,为获得小麦、玉米高产,我国磷肥(P_2O_5)用量逐年增加^[1],由1990年的 $6.0 \times 10^6 \text{ t}$ 增加到2005年的 $12.7 \times 10^6 \text{ t}$,而同期作物产量仅增加7%^[2-3].在我国大部分地区磷肥利用率较低^[4],当季利用率低于20%^[5-6],导致磷素在土壤中大量积累^[7],据鲁如坤^[8]报道,我国自施用磷肥以来到1992年累积在土壤中的磷可能有 $1.5 \times 10^7 \text{ t}$.耕层土壤 Olsen-P 水平逐年增加^[9],当土壤可溶性磷超过土壤固持能力(土壤磷素饱和点)时,易发生淋溶损失^[10-12].Blake 等^[13]认为土壤 Olsen-P 可以作为磷素淋溶的指标,McDowell 等^[14]和 Blake 等^[13]把开始发生淋溶的 Olsen-P 浓度称为“拐点”(change point),Butler 等^[15]、吕家陇等^[16]和钟晓英等^[17]称为淋溶阈值(threshold).影响 Olsen-P 发生淋溶的因素有耕层 Olsen-P 浓度及其在土壤扩散运移速度^[18]、土壤质地、磷素形态和来源等^[19-20].Sharpley 等^[21]认为有机肥与无机磷肥结合可加快土壤 Olsen-P 积累和淋溶风险.吕家珑^[22]曾对磷肥施用及其对环境风险作过预测,认为陕西黄土耕层土壤中 Olsen-P 发生淋溶的“阈值”是 $23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[16];赵小蓉等^[23]对23种土壤的磷素淋溶阈值进行了测定,认为石灰性潮土的临界值是 $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.Brock 等^[24]认为当土壤 Olsen-P 含量小于“突变点”值时,磷素发生淋溶的机会较小,当土壤 Olsen-P 含量大于“突变点”值时,磷素可能发生淋溶,英国面积较大的8种土壤 Olsen-P 含量“突变点”为 $13 \sim 119 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.Tang 等^[25]总结了小麦/玉米轮作区潮土、潮褐土和壤土长期定位施肥试验结果,认为 Olsen-P 向下淋溶的浓度在 $20 \sim 30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.李琪等^[26]认为,当土壤有效磷含量大于 $14.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,施肥量高于 $120 \text{ kg P} \cdot \text{hm}^{-2}$,磷淋失或迁移危险级别为“高”,磷流失危险增加.

潮土是我国重要的小麦、玉米主产区,其中75%的潮土质地较轻,分布在黄河、淮河、海河流域,这几个水系是黄淮海地区的饮用水和灌溉水来源,

且每年7—9月雨季集中,因此潮土磷肥安全施用问题不容忽视,而针对黄淮海地区土壤磷素动态变化和垂直迁移方面的系统研究较少.本研究基于20年长期定位施肥试验,探讨潮土耕层土壤 Olsen-P 与作物产量的关系,寻找土壤 Olsen-P 最佳范围,并通过 Olsen-P 在土壤中的累积和垂直移动规律,寻找土壤 Olsen-P 生态安全阈值,预测当前施肥条件下土壤 Olsen-P 达到安全阈值的时间,旨在保证作物产量持续稳定高产的前提下,合理利用有机肥和磷肥,减少磷素在土壤中的累积和流失.

1 材料与方法

1.1 试验设计

1990年在郑州国家潮土肥力和肥料效益监测基地设立了不同施肥条件下作物产量与土壤肥力和肥料效益长期定位监测试验.供试土壤为潮土,0~28 cm为轻壤,大于0.01 mm物理性砂粒含量74%,耕层土壤全氮 $0.65 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,有机质 $10.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全磷 $0.065 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷(Olsen-P) $7.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, CaCO_3 $48 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH 8.3.实行冬小麦-夏玉米轮作,共设置6个施肥处理:NK:施氮钾肥,不施磷肥;NPK:施氮磷钾肥;MNPk:总N与NPK处理相同,其中70%的N由有机肥提供,根据其含N量确定有机肥用量;1.5MNPk:所有肥料用量均是MNPk处理的1.5倍;SNPK:总N与NPK处理相同,2002年以前70%的N由秸秆还田提供,根据秸秆含N量确定用量,2003—2008年只将该处理玉米秸秆还田,N不足部分由尿素补充;MNPk2:小麦-大豆轮作,每年过磷酸钙P用量 $62 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,有机肥P用量 $63 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,总P量为 $125 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$.小麦季施 $36 \text{ kg P} \cdot \text{hm}^{-2}$;玉米季1991年施 $36 \text{ kg P} \cdot \text{hm}^{-2}$,1992年以后为 $41 \text{ kg P} \cdot \text{hm}^{-2}$,全部做基肥.试验小区面积 $16 \text{ m} \times 25 \text{ m}$,没有重复,小麦、玉米产量每个小区采集5个点,去掉一个最高值和一个最低值,用其他3个值取平均值.

1.2 供试材料

供试肥料品种: 氮肥是尿素, 磷肥是普通过磷酸钙(开封磷肥厂生产, P_2O_5 12.05%), 钾肥用氯化钾(K_2O 60%). 供试作物品种: 小麦品种先后用豫麦 13、郑太育 1 号、临汾 7203、郑州 891、豫麦 47、豫麦 8998、郑麦 9023、郑麦 9694、郑麦 9622; 1990—2006 年玉米品种为郑单 8 号, 2007 年为郑单 958, 2008 年为郑单 136. 长期定位试验历年所用有机肥中 N、P 含量和各处理土壤中来自化肥和有机肥的 N、P、K 量见表 1 和表 2.

表 1 长期定位试验历年所用有机肥中氮、磷含量

Table 1 N, P contents in manure used in long-term experiment during 1990–2006

年份 Year	有机肥类型 Manure type	N ($g \cdot kg^{-1}$)	P ($g \cdot kg^{-1}$)	有机肥干物质量 Manure dry mass ($\times 10^3 kg \cdot hm^{-2}$)
1990	马粪 Horse dung	14.7	5.4	7.9
1991	马粪 Horse dung	21.4	7.7	5.4
1992	马粪 Horse dung	13.3	6.5	8.7
1993	马粪 Horse dung	13.9	7.9	8.3
1994	马粪 Horse dung	11.6	9.8	10.0
1995	马粪 Horse dung	8.3	5.8	13.9
1996	马粪 Horse dung	12.7	5.7	9.1
1997– 1998	马粪 Horse dung	13.3	3.4	8.7
1999	牛粪 Cow dung	6.3	6.8	18.3
2000	厩肥 Barnyard manure	2.3	2.3	50.2
2001	牛粪 Cow dung	10.5	5.6	11.0
2002	厩肥 Barnyard manure	6.1	4.4	10.9
2003– 2004	牛粪 Cow dung	17.0	9.4	6.0
2005– 2006	牛粪 Cow dung	12.0	4.9	9.6

表 2 各处理土壤中来自化肥和有机肥的 N、P、K 量

Table 2 Amount of N, P, K in soil from fertilizer and manure under different treatments

处理 Treatment	P 用量 P amount ($kg \cdot hm^{-2}$)	来自无机肥的养分 Nutrient from fertilizer ($kg \cdot hm^{-2}$)			来自有机肥的养分* Nutrient from manure ($kg \cdot hm^{-2}$)		
		N	P	K	N	P	K
NK	0	352.5	0	146.3	0	0	0
NPK	77.0	352.5	77	146.3	0	0	0
MNPK	140.0	237.0	77	146.3	115.5	63.0	88.0
1.5MNPK	210.0	355.5	116	219.4	173.0	94.5	132.0
SNPK	90.0	237.0	77	146.3	115.5	12.5	234.0
MNPK2	125.0	110.0	62	118.0	115.5	63.0	88.0

* 有机肥或秸秆带进土壤的 N、P、K 量($kg \cdot hm^{-2}$) = 有机肥或秸秆使用量($kg \cdot hm^{-2}$) × 有机肥或秸秆中 N、P、K 含量(%) N, P, K amount in soil from manure or straw ($kg \cdot hm^{-2}$) = The amount of manure or straw applied ($kg \cdot hm^{-2}$) × N, P, K content in manure or straw (%).

1.3 样品采集与分析

试验前经过两年匀地栽培, 1990 年秋开始试验, 试验前采集基础土样(0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm). 1998 年以后每年玉米收获后取 0 ~ 100 cm 土壤样品, 采取多点取样法, 样品在室内风干, 去掉根毛和杂物, 过 20 目尼龙筛备用. 土壤 Olsen-P 含量测定采用 $0.5 mol \cdot L^{-1} NaHCO_3$ 浸提-钼锑抗比色法^[27]. 有机肥及秸秆中磷素测定: 有机肥及秸秆在 70 °C 下烘干, 称取烘干样品 0.3 g, 用浓硫酸浸泡过夜, 在 300 °C 高温下消煮 1 h 左右, 直到消化液澄清, 定容到 100 ml 容量瓶中, 吸取上清液 5 ml, 用钼锑抗显色 30 min, 在 700 nm 波长下用 752 型紫外分光光度计比色.

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2003 软件对数据进行处理和绘图.

2 结果与分析

2.1 长期施肥条件下耕层土壤 Olsen-P 的积累规律

图 1 为土壤 Olsen-P 随施肥时间的变化规律. 长期施用化肥(NPK)土壤中 Olsen-P 缓慢增加, 与施肥年份呈明显的线性关系: $Y_{NPK} = 0.491x + 11.204$ ($R^2 = 0.4873$), 平均每年增加 $0.49 mg \cdot kg^{-1}$, 相当于每施入 $100 kg P \cdot hm^{-2}$ 土壤 Olsen-P 增加 $0.63 mg \cdot kg^{-1}$. 秸秆还田处理每年 P 用量 $90 kg \cdot hm^{-2}$ 时, 与施肥年份呈线性关系: $Y_{SNPK} = 0.654x + 9.7782$ ($R^2 = 0.6404$), 平均每年增加 $0.65 mg \cdot kg^{-1}$, 相当于每施入 $100 kg P \cdot hm^{-2}$ 土壤 Olsen-P 增加 $0.72 mg \cdot kg^{-1}$. 长期施用有机肥土壤 Olsen-P 积累速度加快, MNPK 和 MNPK2 处理 P 施入量为 140 和 $125 kg \cdot hm^{-2}$, 土壤中 Olsen-P 与施肥年份的线性关系为: $Y_{MNPK} = 3.1097x + 6.9615$ ($R^2 = 0.8562$) 和 $Y_{MNPK2} =$

$2.4765x+13.563$ ($R^2=0.9307$), 平均每年增加 3.1 和 $2.47 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 相当于每施入 $100 \text{ kg P} \cdot \text{hm}^{-2}$ 土壤 Olsen-P 增加 $2.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 1.5MNPK 处理每年施用 $210 \text{ kg P} \cdot \text{hm}^{-2}$, 土壤中 Olsen-P 与施肥年份的关系为: $Y_{1.5\text{MNPK}}=4.506x+6.4464$ ($R^2=0.8862$), 平均每年增加 $4.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 相当于每施入 $100 \text{ kg P} \cdot \text{hm}^{-2}$ 土壤 Olsen-P 增加 $2.14 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 有机肥无机肥配施处理耕层土壤 Olsen-P 的累积速度是化肥处理的 3.5 倍.

2.2 长期施肥条件下 Olsen-P 在土壤剖面的垂直移动

由图 2 可知, 1988 年 0~100 cm 土壤 Olsen-P 低于 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 连续 15 年不施磷肥(NK)土壤耗竭磷素较多, 0~100 cm 土层 Olsen-P 低于 $5 \text{ mg} \cdot$

kg^{-1} ; 化肥处理(NPK)2000 年和 2005 年耕层土壤 Olsen-P 小于 $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 40~60 cm 土层 15 年基本维持在 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 向下迁移趋势不明显. 常量有机肥处理(MNPK 和 MNPK2)连续施用 10 年耕层土壤 Olsen-P 含量高于 $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而同期 40~60 cm 土层 Olsen-P 含量接近 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 远高于不施磷肥和化肥处理, 表明 Olsen-P 已经向下迁移; 高量有机肥(1.5MNPK)处理连续施用 10 年耕层土壤 Olsen-P 高于 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 60 cm 以下土层达到 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 连续施用 15 年后, 耕层土壤 Olsen-P 大于 $80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 20~40 cm 土层高于 0~20 cm, 这一方面是由于耕作造成, 另一方面是由于 7—10 月的强降水造成. 表明表层土壤 Olsen-P 含量越高, 向下淋失的强度越大.

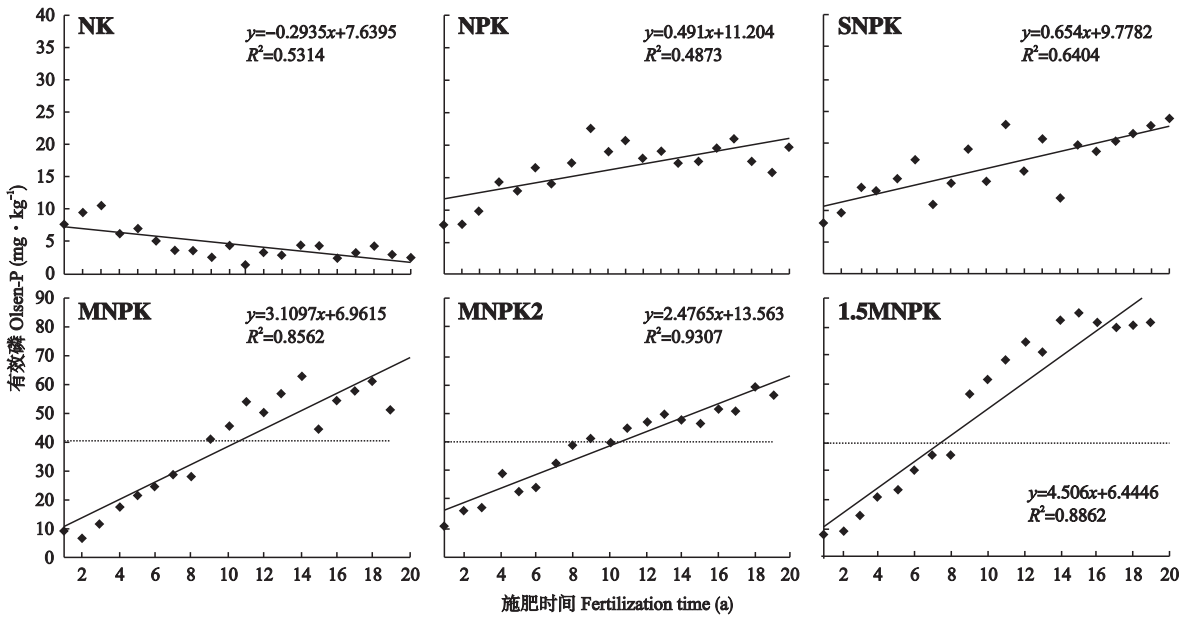


图 1 长期施肥条件下耕层土壤 Olsen-P 的动态变化
Fig. 1 Dynamics of soil Olsen-P under long-term fertilization.

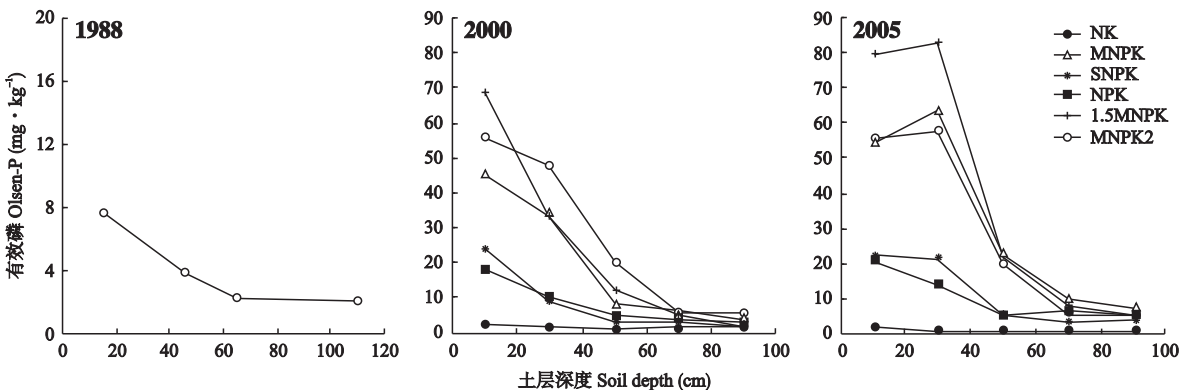


图 2 Olsen-P 在 0~100 cm 土壤剖面的分布
Fig. 2 Vertical distribution of Olsen-P in 0-100 cm soil layer.

2.3 土壤 Olsen-P 与作物产量的关系

分别作土壤 Olsen-P 含量为 $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的垂直线和产量为 $4000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的水平线把小麦和玉米产量分别分成 4 个区(图 3),以直观分析耕层土壤 Olsen-P 含量与小麦、玉米产量的关系. 分布在 a 区的小麦、玉米样本均为 71 个,分别占总样本的 56.3% 和 65.7%,即产量大于 $4000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的小麦、玉米样本中分别有 65% 和 78% 分布在土壤 Olsen-P 含量小于 $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的区域. 分布在 b 区的小麦、玉米样本分别为 31 和 20 个,分别占总样本的 24.6% 和 18.5%,即当土壤 Olsen-P 含量大于 $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,只有 18% ~ 24% 的样本获得高产,且产量范围仍然在 $4000 \sim 8000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. 分布在 c 区的小麦、玉米样本分别为 16 和 17 个,分别占总样本的 12.7% 和 15.7%,无论小麦还是玉米,产量低于 $4000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的样本全部分布在土壤 Olsen-P 含量

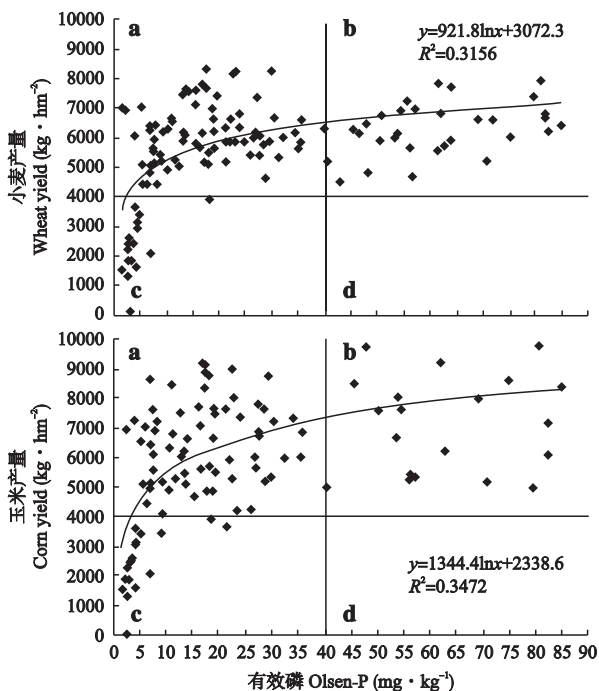


图 3 作物产量与耕层土壤 Olsen-P 的关系

Fig. 3 Relationship between crop yield and Olsen-P in 0–20 cm soil layer.

a) Olsen-P 含量小于 $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 作物年产量大于 $4000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的样本区域 The samples with the Olsen-P content lower than $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and the crop yield more than $4000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; b) Olsen-P 含量大于 $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 作物年产量大于 $4000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的样本区域 The samples with the Olsen-P content more than $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and the crop yield more than $4000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; c) Olsen-P 含量小于 $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 作物年产量小于 $4000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的样本区域 The samples with the Olsen-P content lower than $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and the crop yield lower than $4000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; d) Olsen-P 含量大于 $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 作物年产量小于 $4000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的样本区域 The samples with the Olsen-P content more than $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and the crop yield lower than $4000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$.

小于 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的范围内,即 Olsen-P 含量低于 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,获得高产的可能性很小. 综上,土壤 Olsen-P 在 $10 \sim 40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 是作物获得高产的适宜范围,当耕层土壤 Olsen-P 含量大于 $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,土壤向下淋溶明显增强, $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 可能是壤质潮土 Olsen-P 的安全阈值. 这与其他研究结果相近^[11,18,25].

3 讨 论

当耕层土壤 Olsen-P 含量小于 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,小麦和玉米很难获得高产,可以通过增施化肥或有机肥的方式尽快达到这个含量. 当耕层土壤 Olsen-P 含量大于 $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,作物产量增加不明显,而土壤 Olsen-P 向下淋溶明显增强,所以,土壤 Olsen-P 在 $10 \sim 40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 是作物获得高产和磷素不发生淋溶的适宜范围, $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 是壤质潮土 Olsen-P 的淋溶阈值. 依此推测,施 P 量为 $77 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的化肥和秸秆还田处理,连续施用 60 年和 45 年才能达到淋溶阈值.

我国华北地区磷肥主要来源于矿物磷肥(普钙或重钙)、化学磷肥(磷酸铵等)、有机肥(畜禽粪便)和秸秆. 其中,矿物磷肥和化学磷肥的使用量可满足作物需求,在土壤中积累较少;秸秆中的磷素经过分解和转化积累到土壤中的有效态磷较小,可缓慢增加土壤有效磷含量;而有机肥中磷素含量较高,磷素形态复杂且分解较快,对土壤有效磷的贡献是化肥的 2 ~ 4 倍,而且,容易向下淋溶^[27]. 本研究认为施 P 量为 $140 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,达到淋溶阈值需要 11 年,当施 P 量为 $210 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,只需要 8 年. 有机肥用量越大,达到阈值的时间越短,但如果过量施用,将有可能造成环境污染. 本研究设计施氮量的 70% 来自有机肥,使耕层土壤 Olsen-P 积累明显高于化肥或秸秆还田,连续施用 10 年存在淋溶风险,表明有机肥用量过大,建议有机肥的比例不超过施 N 量的 40%,保证土壤的有效磷含量常年在 $10 \sim 40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围内.

参考文献

- [1] Gao X-Z (高祥照), Ma W-Q (马文奇), Cui Y (崔勇), *et al.* Changes of soil nutrient contents and input of nutrients in arable of China. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2000, **6**(4): 363–369 (in Chinese)
- [2] The Ministry of Agriculture of the People's Republic of China (中华人民共和国农业部). *China Agriculture*

- Yearbook 1991. Beijing: China Agriculture Press, 1991 (in Chinese)
- [3] The Ministry of Agriculture of the People's Republic of China (中华人民共和国农业部). China Agriculture Yearbook 2006. Beijing: China Agriculture Press, 2006 (in Chinese)
- [4] Chen L-S (陈伦寿). We should treat the utilization efficiency of fertilizers correctly. *Phosphate & Compound Fertilizer* (磷肥与复肥), 1996(4): 4-7, 27 (in Chinese)
- [5] Huang S-M (黄绍敏), Bao D-J (宝德俊), Huangfu X-R (皇甫湘荣), *et al.* Long-term effect of fertilization on fertilizer use efficiency of wheat in soil. *Journal of Triticeae Crops* (麦类作物学报), 2006, **26**(2): 121-126 (in Chinese)
- [6] Zhang F-S (张福锁), Wang J-Q (王激清), Zhang W-F (张卫峰), *et al.* Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2008, **45**(5): 915-924 (in Chinese)
- [7] Huang S-M (黄绍敏), Bao D-J (宝德俊), Huangfu X-R (皇甫湘荣), *et al.* Effect of long-term fertilization on utilization and accumulation of phosphate nutrient in Fluvo-aquic soil. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2006, **39**(1): 102-108 (in Chinese)
- [8] Lu R-K (鲁如坤). Principal of Soil-Plant Nutrients and Fertilization. Beijing: Chemistry Industry Press, 1998 (in Chinese)
- [9] Xin J-S (辛景树), Xu M-G (徐明岗), Tian Y-G (田有国), *et al.* Evolution of Cultivated Land Quality. Beijing: China Agriculture Press, 2008 (in Chinese)
- [10] Toth JD, Dou Z, Ferguson JD, *et al.* Nitrogen- vs. phosphorus-based dairy manure applications to field crops: Nitrate and phosphorus leaching and soil phosphorus accumulation. *Journal of Environmental Quality*, 2006, **35**: 2302-2312
- [11] Graetz DA, Nair VD, Portier KM, *et al.* Phosphorus accumulation in manure-impacted Spodosols of Florida. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1999, **75**: 31-40
- [12] Whalen JK, Chang C. Phosphorus accumulation in cultivated soils from long-term annual applications of cattle feedlot manure. *Journal of Environmental Quality*, 2001, **30**: 229-237
- [13] Blake L, Hesketh N, Fortune S, *et al.* Assessing phosphorus 'Change-Points' and leaching potential by isotopic exchange and sequential fractionation. *Soil Use and Management*, 2002, **18**: 199-207
- [14] McDowell R, Sharpley A, Brookes P, *et al.* Relationship between soil test phosphorus and phosphorus release to solution. *Soil Science*, 2001, **166**: 137-149
- [15] Butler JS, Coale FJ. Phosphorus leaching in manure-amended Atlantic Coastal Plain soil. *Journal of Environmental Quality*, 2005, **34**: 370-381
- [16] Lü J-L (吕家珑), Fortune S, Brookes PC. Research of phosphorus leaching from soil and its Olsen-P "threshold volume". *Journal of Agro-Environment Science* (农业环境科学学报), 2003, **22**(2): 142-146 (in Chinese)
- [17] Zhong X-Y (钟晓英), Zhao X-R (赵小蓉), Bao H-J (鲍华军), *et al.* The evaluation of phosphorus leaching risk of 23 Chinese soils. I. Leaching criterion. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2004, **24**(10): 2275-2280 (in Chinese)
- [18] Xu M-G (徐明岗), Sun B-H (孙本华), Zhang Y-P (张一平). Diffusion of phosphate and its energetic characteristics in soils. II. Influence of phosphorus application rate and its interaction with soil moisture or/and temperature. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 1998, **35**(1): 55-65 (in Chinese)
- [19] Griffin TS, Honeycutt CW, He Z, *et al.* Change in soil phosphorus from manure application. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, **67**: 645-673
- [20] Tiessen H, Stewart JWB, Moir JO. Changes in organic and inorganic phosphorus composition of two grassland soils and their particle size fractions during 60-90 years of cultivation. *European Journal of Soil Science*, 1983, **34**: 815-823
- [21] Sharpley AN, Sisak I. Differential availability of manure and inorganic source of phosphorus in soil. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, **61**: 1503-1508
- [22] Lü J-L (吕家珑). Phosphorus leaching from agricultural soils and its prediction. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2003, **23**(12): 2689-2701 (in Chinese)
- [23] Zhao X-R (赵小蓉), Zhong X-Y (钟晓英), Li G-T (李贵桐), *et al.* The evaluation of phosphorus leaching risk of 23 Chinese soils. II. The relationships between soil properties, P adsorption characteristics and the leaching criterion. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2006, **26**(9): 3011-3017 (in Chinese)
- [24] Brock EH, Ketterings QM, Kleinman PJA. Phosphorus leaching through intact soil cores as influenced by type and duration of manure application. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2007, **77**: 269-281
- [25] Tang X, Ma Y, Hao X, *et al.* Determining critical values of soil Olsen-P for maize and winter wheat from long-term experiments in China. *Plant and Soil*, 2009, **323**: 143-151
- [26] Li Q (李琪), Chen L-D (陈利顶), Qi X (齐鑫), *et al.* Catchment scale risk assessment and critical source area identification of agricultural phosphorus loss. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(9): 1982-1986 (in Chinese)
- [27] Li Q-K (李酋开), Jiang B-F (蒋伯藩), Yuan K-N (袁可能). The Analysis of Soil Agro-chemistry. Beijing: Science Press, 1984 (in Chinese)

作者简介 黄绍敏,女,1967年生,博士,副研究员.主要从事长期施肥对土壤和作物的影响与评价研究,发表论文26篇. E-mail: hsm503@126.com

责任编辑 张凤丽